

Soutenance de Thèse



LABORATOIRE de MÉCANIQUE et GÉNIE CIVIL

Agathe de Sercey



Vendredi 12 décembre 2025 à 9:30

Amphithéâtre Jean Jacques Moreau
860, rue de Saint Priest, Bat. 2
34090 Montpellier



« Intégration du triplet tribologique dans une approche numérique multi-échelle : application au freinage aéronautique. »

Le jury est composé de :

Mme. Christine BOHER, Professeure, IMT Mines Albi-Carmaux, Rapporteure
M. Jean-François MOLINARI, Professeur, EPFL, Rapporteur
M. Karl DELBÉ, Maître de conférence, ENI TARBES, Examinateur
M. Yannick DESPLANQUES, Professeur, École Centrale de Lille, Examinateur
M. Francesco MASSI, Professeur, University of Rome «La Sapienza», Examinateur
M. Aurélien SAULOT, Professeur, INSA Lyon, Examinateur
M. Valentin RIPARD, Ingénieur, Safran Landing Systems, Invité
M. Mathieu RENOUF, Chargé de recherche CNRS, LMGC, Co-directeur de thèse
M. Florent BOUILLON, Ingénieur, Safran Ceramics, Co-directeur de thèse

Résumé - Abstract

Dans le domaine du freinage aéronautique, la prédiction fiable de la durée de vie des puits de chaleur constitue un enjeu scientifique et industriel majeur. Dans ces systèmes, le comportement au contact est fortement influencé par la présence de troisième corps, jouant un rôle central dans la transmission des efforts, la génération de chaleur et les mécanismes d'usure. Sa dynamique dépend étroitement de la topographie locale et des conditions mécaniques et thermiques. Cette complexité rend les approches de modélisation classiques insuffisantes : une description fine des mécanismes locaux, articulée avec une vision globale du système, est indispensable pour prédire l'évolution de l'état de l'interface et, finalement, la durée de vie du puits de chaleur. Pour répondre à cette problématique, cette thèse propose une stratégie numérique originale fondée sur le concept de triplet tribologique, permettant d'articuler les différents phénomènes mis en jeu à plusieurs échelles et d'évaluer la durée de vie des composants en tenant compte des effets d'échelle associés.

La démarche développée dans ce manuscrit repose sur une modélisation multi-échelle structurée en trois niveaux : le mécanisme et le volume des premiers corps, l'interface de contact, et le troisième corps. À l'échelle de l'interface, un modèle de type Automates Cellulaires (AC) est élaboré afin de simuler le circuit tribologique et de prédire les différents débits de matière (génération, distribution). Ce modèle prend en compte la topographie locale des surfaces en contact ainsi que l'état mécanique normal, pour décrire de façon réaliste l'évolution du troisième corps au sein de l'interface rugueuse.

Ce modèle AC est ensuite couplé à un modèle de contact local basé sur la Boundary Element Method (BEM) accélérée par Transformée de Fourier Rapide (FFT), permettant de résoudre l'équilibre mécanique local pour des surfaces réelles. Ce couplage donne naissance au modèle TriCAu (Tribological Cellular Automata). Une confrontation de l'approche à des essais expérimentaux est réalisée, puis des techniques d'accélération numérique sont mises en place pour garantir un coût de calcul compatible avec les contraintes industrielles.

Enfin, une stratégie de dialogue multi-échelle est proposée en ouverture : les champs thermomécaniques issus d'un calcul éléments finis macroscopique sont injectés au niveau local pour initialiser le modèle TriCAu, qui en retour fournit les débits de matière et l'évolution de l'état de surface. Lorsque la masse critique de matière perdue est atteinte, une remontée d'échelle actualise le modèle macroscopique, permettant ainsi

une prédiction évolutive de la durée de vie.

Cette approche intégrée ouvre la voie à une meilleure compréhension et une modélisation prédictive de l'usure dans les systèmes de freinage aéronautique. Elle constitue une avancée significative, en combinant la description fine des mécanismes locaux et la représentativité globale du composant, tout en maintenant des temps de calcul raisonnables.

In the field of aeronautical braking, the reliable prediction of heat sink lifetime is a major scientific and industrial challenge. In these systems, contact behavior is strongly influenced by the presence of third-body, which plays a central role in load transmission, heat generation, and wear mechanisms. Its dynamics depend closely on the local surface topography and on mechanical and thermal conditions. This complexity makes conventional modeling approaches inadequate: a detailed description of local mechanisms, combined with a global vision of the system, is essential to predict the evolution of the interface state and, ultimately, the lifetime of the heat sink. To address this issue, this thesis proposes an original numerical strategy based on the tribological triplet concept, enabling the coupling of phenomena acting at multiple scales and the evaluation of component lifetime while accounting for scale effects.

The methodology developed in this work relies on a multi-scale modeling framework structured around three levels: the mechanism and bulk material (first bodies), the contact interface, and the third-body. At the interface scale, a Cellular Automata (CA) model is developed to simulate the tribological circuit and predict the various material flows (generation, distribution). This model accounts for the local surface topography and the normal mechanical state in order to realistically describe the evolution of the third-body within a rough contact interface.

The CA model is then coupled with a local contact model based on the Boundary Element Method (BEM) accelerated by the Fast Fourier Transform (FFT), allowing efficient resolution of the local mechanical equilibrium for real surface geometries. This coupling leads to the TriCAu (Tribological Cellular Automata) model. The approach is confronted with experimental tests, and numerical acceleration techniques are introduced to ensure a computational cost compatible with industrial constraints.

Finally, a multi-scale coupling strategy is proposed: thermo-mechanical fields obtained from a macroscopic Finite Element (FE) calculation are injected at the local level to initialize the TriCAu model. In return, TriCAu provides information on material flow rates and surface state evolution. When a critical mass loss threshold is reached, the macroscopic model is updated, enabling progressive lifetime prediction. This integrated approach paves the way for improved understanding and predictive modeling of wear in aeronautical braking systems. It represents a significant step forward by combining a fine description of local mechanisms with the global representativeness of the component, while maintaining reasonable computation times.